

Radar Systems for Ice and Snow Measurements Onboard Manned and Unmanned Aircraft

F. Rodríguez-Morales, *Senior Member, IEEE*, D. Gómez-García, E. Arnold, *Member, IEEE*, R. Hale, S. Keshmiri, C. Leuschen, *Member, IEEE*, J. Li, *Senior Member, IEEE*, J. Paden, *Member, IEEE*, and C. Cárdenas, *Member, IEEE*

Abstract—In this paper, we present a brief overview of the state of the art in radar systems for ice and snow measurements. Emphasis is given to the instrumentation developed at the University of Kansas for multi-band data retrieval at frequencies ranging from 14 MHz to 38 GHz, which is operated onboard manned and unmanned aircraft. The information collected with these systems is used to estimate parameters such as ice thickness, ice surface and bedrock topography, snow cover thickness on sea ice, and annual snow accumulation. We give a summary of recent field programs (including operations out of Punta Arenas, Chile), present sample results, and discuss recent collaborations with Chilean institutions.

Keywords—Radio echo sounding, airborne radar, cryospheric remote sensing.

I. INTRODUCCION

Los sistemas de radar aerotransportados constituyen una herramienta científica altamente efectiva para la observación sistemática y continua de las regiones frías del planeta [1-6]. Los aparatos de georadar para operación aérea permiten la recolección de datos con una amplia cobertura espacio-temporal, en regiones que son poco accesibles para mediciones *in-situ*, y a un costo significativamente menor en comparación con tecnologías satelitales. Mediante el uso de bandas de frecuencia múltiples con anchos de banda cada vez mayores, los dispositivos de radar aéreos permiten obtener, de manera remota, información específica sobre las masas de hielo y nieve. Aun cuando hay otras técnicas disponibles para esta aplicación (por ejemplo, el lidar [7] y las mediciones con técnicas sismográficas y gravimétricas), los sistemas de georadar se han consolidado como una técnica eficazísima para obtener mediciones de los diferentes estratos de la criósfera con una alta resolución vertical. Además, los datos recopilados a través de radar son de gran utilidad para cuantificar cambios en la periferia de los mantos de hielo más importantes de la tierra, en los glaciares que drenan hacia el mar y en la espesura y extensión del hielo marino. Específicamente, los radares aerotransportados permiten la medición de la topografía superficial del hielo, el

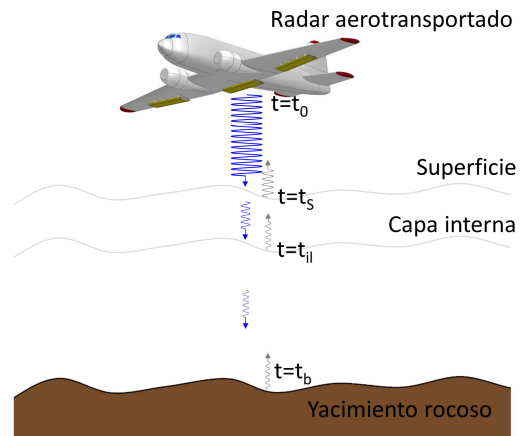


Fig. 1. Ilustración simplificada del principio de operación de la técnica de radio-eco-sondaje (RES) usando radar aerotransportado.

espesor de la cobertura nival de la banquisa, la ganancia de masa estacional en hielo terrestre, la profundidad y estratigrafía de los mantos y casquetes de hielo, y la topografía sub-glaciar del lecho rocoso. Estas variables están íntimamente ligadas con el sistema climático, así como con el nivel del mar y con el volumen de las reservas acuíferas. Su estudio es, por lo tanto, trascendental no solo por razones de índole científica, sino por que brinda pautas para la formulación informada de políticas gubernamentales para la administración de recursos.

La técnica de radio-eco-sondaje (RES) permite mediciones a distancia de la constitución interna del hielo y la nieve mediante la transmisión y reflexión parcial de energía electromagnética. La Fig. 1 ilustra su principio de funcionamiento. El radar aerotransportado genera una señal electrónica en el tiempo inicial $t=t_0$, la cual se repite a intervalos regulares y es radiada a través de una antena transmisora. Las ondas electromagnéticas emitidas por la antena se propagan hasta llegar a la superficie del objetivo bajo estudio en el instante $t=t_s$, donde parte de la energía es reflejada nuevamente hacia la antena receptora, mientras que el resto continúa propagándose. Dado que las formaciones gélidas presentan discontinuidades en su perfil de permitividad relativa como función de la profundidad (causadas a su vez por variaciones en la densidad y la temperatura), éstas provocan reflexiones parciales (en los instantes denotados $t=t_{ii}$ y $t=t_b$) que son captadas por la antena receptora y almacenadas en forma analógica o digital para su procesamiento posterior. Utilizando técnicas numéricas, las diferencias en el tiempo de

arribo de los distintos ecos son convertidas en distancia o profundidad y mostrados en una ecografía o “radargrama”.

El empleo de la técnica de RES se remonta a un descubrimiento fortuito en la década de los años 30, en el cual se observó por primera vez la transparencia del hielo y la nieve a las señales de radio frecuencia [8]. A esta serendipia le ha seguido un vertiginoso avance en el desarrollo de los circuitos electrónicos de estado sólido, lo cual ha permitido la mejora del rendimiento de los sistemas y las técnicas de medición en sí mismas. Diversos grupos alrededor del mundo han contribuido a estos avances a través de esfuerzos colectivos, sobre todo a partir de la década de los 50s.

El programa de percepción remota de la Universidad de Kansas ha contribuido al cultivo de esta área desde sus inicios. En particular, mediante el trabajo pionero que realizaron Moore y otros a inicios de la década de 1960 [9]. En el campo de RES para estudios de la criósfera, las aportaciones más notables de este grupo fueron hechas por Raju *et al.* [10] y Gogineni *et al.* [11] en el decenio de 1990. Estos trabajos incluyeron la verificación experimental de una sonda de profundidad basada en georadar de estado sólido y fase coherente que fue operado en la banda de VHF. Las sondas desarrolladas por Raju, Gogineni y otros se convirtieron en versiones progresivamente más avanzadas que operarían a frecuencias cada vez más altas, permitiendo extender aún más sus anchos de banda. De manera general, la resolución vertical de un radar mejora en tanto su ancho de banda incrementa, lo que en este contexto permite la detección de acumulación estacional de nieve y es útil para investigaciones de las características intrínsecas del hielo. Además, para inferir propiedades físicas de la nieve (tales como su densidad y su equivalente en agua líquida) a través de RES, es necesario operar en bandas multi-frecuencias [12-13]. Implementaciones aún más avanzadas de las que expusieron Raju *et al.* y Kanagaratnam *et al.* son desplegadas hoy en día de manera rutinaria, a bordo de aeronaves tripuladas como parte de la Operación Puente de Hielo (Operation IceBridge o OIB en inglés) de la Administración Nacional Aeronáutica y del Espacio (NASA) de los Estados Unidos [14-15] y otras actividades de campo encabezadas por el Centro de Percepción Remota de Mantos de Hielo (CReSIS en inglés) de la institución antes mencionada [16-18]. Las capacidades de los radares del CReSIS se han expandido a través de los años hasta permitir la operación de instrumentación a bordo de sistemas (o vehículos) aéreos no tripulados (UASs o UAVs por sus siglas en inglés) [19- 22].

El presente trabajo se ofrece como una extensión significativa de la ponencia presentada en el primer simposio internacional de Geociencia y Teledetección (GRSS) del IEEE que se llevó a cabo en Chile en junio del 2017 [1,18]. El artículo está organizado como se indica a continuación. Primeramente, en la Sección II se presenta un breve resumen del estado del arte en el campo de los sistemas de RES aerotransportados para mediciones de hielo y nieve y una descripción general de la colección de instrumentos del CReSIS. Se da énfasis al paquete incluido a bordo del avión DC-8 de la NASA y que opera desde Punta Arenas en Chile. Las Secciones III y IV presentan una sinopsis de las operaciones de campo

sirviéndose de aeronaves tripuladas y no tripuladas, ofreciendo ecografías representativas que se obtuvieron durante despliegues recientes. En la Sección V se brinda un resumen de las actividades realizadas en el marco de la cooperación internacional entre la Universidad de Kansas e instituciones chilenas, incluyendo proyectos pretéritos en colaboración con el Centro de Estudios Científicos (CECS) en Valdivia y una colaboración más reciente con la Universidad de Magallanes (UMag) en Punta Arenas. Finalmente, la Sección V cierra el documento con un resumen.

II. PERSPECTIVA GENERAL DEL ESTADO DEL ARTE EN INSTRUMENTOS DE RES AEROTRANSPORTADOS Y LA COLECCIÓN DE INSTRUMENTOS DEL CReSIS

A. Estado del Arte

Como se mencionó en la Sección I, diversos grupos a nivel mundial han desarrollado y desplegado sistemas de radar para mediciones en hielo y nieve empleando plataformas superficiales y aéreas. Las principales diferencias entre los sistemas de vía aérea y terrestre radican en la capacidad de los primeros para operar con mayor potencia de transmisión, altas frecuencias de repetición (PRF en inglés) y grandes tasas de datos. Una lista no exhaustiva de instrumentos aerotransportados desarrollados en los últimos años incluye los del Instituto Alfred Wegener de Alemania (AWI) [23] y el Centro Británico de Reconocimiento Antártico (BAS) [4], que operan a 150 MHz; los sistemas de 60 MHz empleados por el Instituto de Geofísica de la Universidad de Texas (UTIG) [5], el Instituto Nacional de Geofísica y Vulcanología (INGV) en Italia [6] y la Universidad Técnica de Dinamarca (DTU) [24]; el radar aerotransportado para hielo de la Universidad de Münster (UMAIR) que funciona a 30 MHz [25]; la sonda polarimétrica aerotransportada de radar para hielo (POLARIS) de la Agencia Espacial Europea, que opera en la banda P del espectro electromagnético [26]; la sonda para hielo templado del Centro de Estudios Científicos de Chile [27]; el sistema de radar de frecuencia modulada con onda continua (FMCW) desarrollado en la Universidad Tecnológica de Hamburgo en Alemania [28]; la sonda exploradora de hielo templado (WISE) del Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA [29], ambos operando por debajo de los 5 MHz; y la sonda de profundidad de radar multicanal (MCoRDS por su acrónimo anglosajón) del CReSIS de la Universidad de Kansas; la sonda de radar de banda ultra-ancha y las sondas de baja frecuencia que actualmente operan a 195 MHz, 375 MHz y 14/35 MHz, respectivamente [17,30]. Otras investigaciones sobresalientes incluyen el trabajo de científicos noruegos y rusos, quienes desarrollaron, paralelamente, sistemas de radar para 6 MHz y 10 MHz, respectivamente. Estos sistemas fueron embarcados en helicóptero y avión y se emplearon para el sondeo de hielo templado en glaciares de la isla Spitsbergen, en el parque nacional noruego Saltfjellet-Svartisen y en el archipiélago ruso de la Tierra de Francisco José [31-33]; además de la radio sonda embarcada en un avión de doble turbina de la Fuerza Aérea de Chile (FACH), que fue utilizado en los glaciares del Parque Nacional Torres del Paine en la Patagonia [34-35].

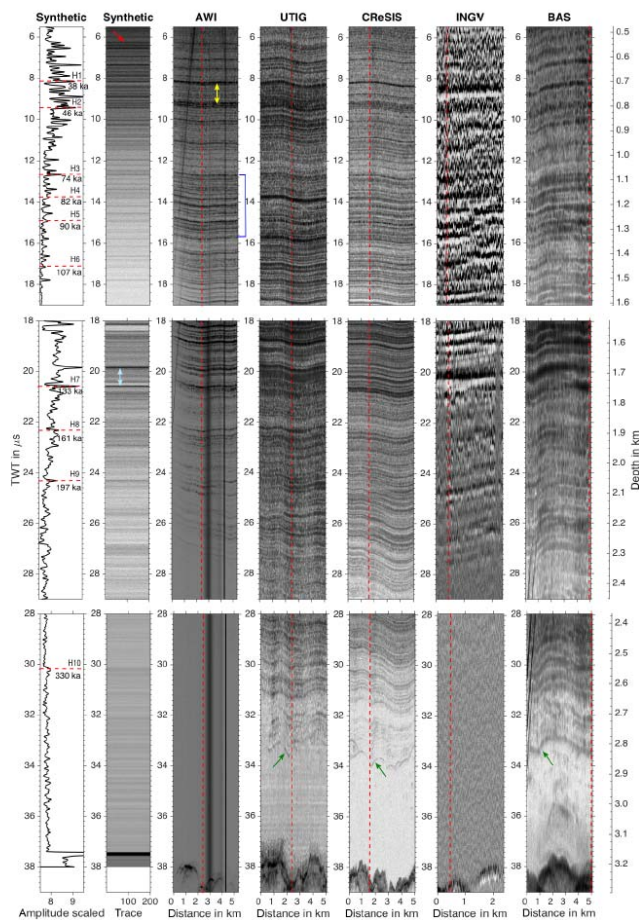


Fig. 2. Ecografías mostrando un corte transversal del manto de hielo Antártico a partir de datos de RES obtenidos con cinco instrumentos diferentes (reproducido de la referencia [36], con permiso de la autora).

Para ilustrar las diferencias en el rendimiento de algunos de estos instrumentos, la Fig. 2 muestra una comparación reciente realizada por Winter *et al.* [36], en la cual se incluyen diferentes ecografías del manto de hielo Antártico producidas con datos de los radares de AWI, UTIG, CREStS, INGV y BAS. Las escalas vertical y horizontal indican la profundidad del manto (depth) y la distancia (distance), respectivamente, ambas en km. Como puede observarse en los diferentes recuadros, los cinco sistemas son capaces de revelar la frontera entre el hielo y el sustrato rocoso (localizada a una profundidad mayor a los 3.2 km), así como la textura interna del corte con diferentes grados de resolución y nitidez. A diferencia de los georadares para estudios de hielo mencionados con anterioridad, los procedimientos de teledetección empleados en el análisis de cobertura nival generalmente utilizan señales de microondas y/u ondas milimétricas para establecer una relación de mayor ancho de banda, incrementando así su resolución, aun cuando esto implica disminuir la penetración de la señal. Como se mencionó con anterioridad, las mediciones de banda ancha son ventajosas para la determinación de las características de dispersión en nieve, pues éstas dependen en gran medida de la frecuencia y guardan una estrecha relación con su composición y densidad [37-40]. Algunos ejemplos de sistemas embarcados en aeronaves que fueron desarrollados específicamente para reconocimiento de nieve incluyen al

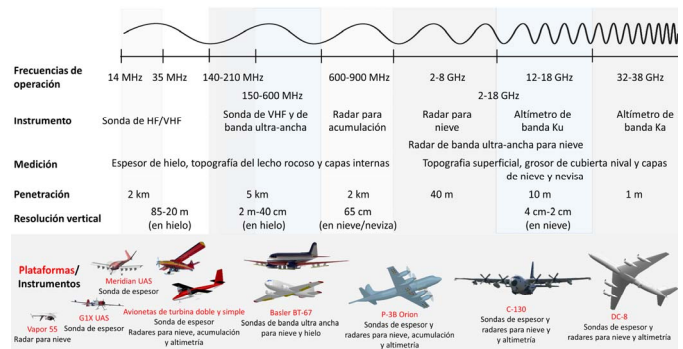


Fig. 3. Semblanza gráfica de la colección de instrumentos del CREStS para mediciones de hielo y nieve [18].

radar de monopulso y fase con retardo Doppler (D2P) del Laboratorio de Física Aplicada de la Universidad Johns Hopkins (JHU/APL) [41]; el sistema de radar aerotransportado de apertura sintética e interferometría de la Agencia Espacial Europea [42]; y los radares de nieve de la Universidad de Kansas [15,40,43-45], los cuales se examinarán con mayor detenimiento en la siguiente sección.

B. Colección de Instrumentos del CREStS

Los radares desarrollados en el CREStS operan en varias bandas de frecuencia que se extienden desde los 14 MHz hasta los 38 GHz. Las frecuencias más bajas permiten la mayor penetración en el hielo para aplicaciones de sondeo, mientras que las frecuencias más altas facilitan la operación en banda ancha para un mapeo de fina resolución sobre las capas de nieve-neviza. La Fig. 3 fue tomada de la referencia [18] y presenta una semblanza de los instrumentos desarrollados en el CREStS, incluyendo su frecuencia de operación y las aeronaves desde las cuales se han utilizado. La sonda de baja frecuencia opera en la parte inferior del espectro electromagnético (14 MHz y 35 MHz, respectivamente) y se utiliza para detectar la elevación del sustrato rocoso en glaciares cuyo hielo presenta un alto grado de pérdidas dieléctricas efectivas y cuya superficie exhibe plegamientos, fracturas y grietas, causando ecos parásitos difíciles de mitigar. El radar de sondeo e imagenología (RDS/I por sus siglas en inglés) opera en los 140-160 MHz, 180-210 MHz, o 165-215 MHz, dependiendo de la plataforma en la cual es embarcado. El radar para sondeo e imagenología de banda ultra ancha (UWB RDS/I en inglés) es operado en el intervalo de los 150-600 MHz [46]. Ambos dispositivos se utilizan para sondear el yacimiento rocoso y capas internas de gran profundidad en mantos de hielo, con una resolución que varía desde varias decenas de metros hasta menos de 1 m. El radar de acumulación (Accum) opera en el intervalo de los 600-900 MHz y se utiliza tanto para registrar acumulación estacional de nieve, como para medir el espesor de barreras de hielo con alta resolución vertical (de un orden inferior a 1 m) [16]. El radar de nieve (Snow) posee una resolución centimétrica al operar en la banda de los 2 a 8 GHz; y se utiliza primordialmente para cuantificar el grosor de la cobertura de nieve en la banquisa y la ganancia de masa nival en hielo

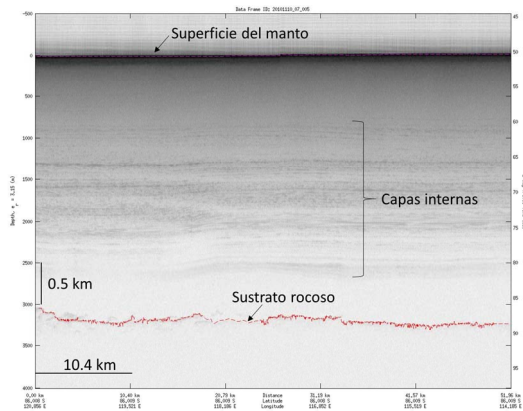


Fig. 4. Ecografía producida con datos recolectados con el RDS/I del CRISIS a bordo del DC-8, volando sobre el Polo Sur (donde el hielo tiene un espesor mayor a los 3 km) a una elevación de más de 8 km sobre la superficie [14].

glacial [15]. El radar altímetro de banda Ku (12-18 GHz) fue diseñado para determinar la topografía de la superficie del hielo y la nieve con resolución centimétrica [44]. También se cuenta con una versión del radar nival de banda ultra ancha que opera en el intervalo de 2-18 GHz [43]. Éste combina el potencial de los otros dos radares de microondas antes mencionados (2-8 GHz y 12-18 GHz), agregando información en la banda X (8-12 GHz), y brindando aún mejor resolución vertical [43,47-48]. Por último, el radar de banda Ka (32-38 GHz) fue desarrollado para demostrar el concepto de un altímetro/escáner de alta resolución, capaz de operar sin importar las condiciones de nubosidad. Todos los instrumentos arriba mencionados han sido acreditados de manera exhaustiva, a bordo de una gran variedad de vehículos, incluyendo aeronaves de reconocimiento tripuladas y teledirigidas. Además, se están desarrollando versiones de estos radares aún más compactas, adecuadas para su operación en helicópteros teleguidados [22, 48].

III. OPERACIÓN A BORDO DE AERONAVES TRIPULADAS

Las principales plataformas empleadas en vuelos de reconocimiento de la Universidad de Kansas incluyen aviones DC-8, P-3, C-130, avionetas de turbina simple y doble, así como aviones modelo BT-67 Basler. La logística y rutina diaria de las operaciones de campo, así como la cobertura geográfica de los vuelos exploratorios varían dependiendo del área de estudio. Los instrumentos han sido operados desde zonas urbanas en Groenlandia, Alaska, Islandia y Chile; así como desde campamentos provisionales instalados en Groenlandia y Antártica. Desde el 2009, todas las expediciones que se han llevado a cabo en el DC-8 de la NASA como parte de la OIB, han tenido su punto de origen en Punta Arenas, aunque recientemente el avión P-3 de la NASA fue operado desde Ushuaia en Argentina. Esto para compensar las limitaciones de alcance del P-3 y maximizar la duración de los vuelos.

Uno de los retos más significativos durante estas misiones se deriva de la ubicación tan remota de los sitios de estudio, resultando en vuelos de tránsito que pueden extenderse por varias horas. Sin embargo, ya que el desempeño de los radares

no se ve afectado por condiciones de nubosidad, estos vuelos son empleados para la calibración y verificación del funcionamiento de los sistemas, además de que permiten la

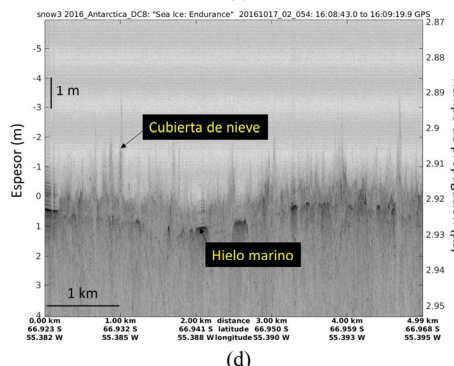
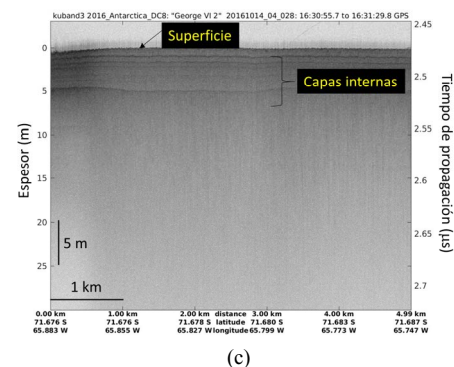
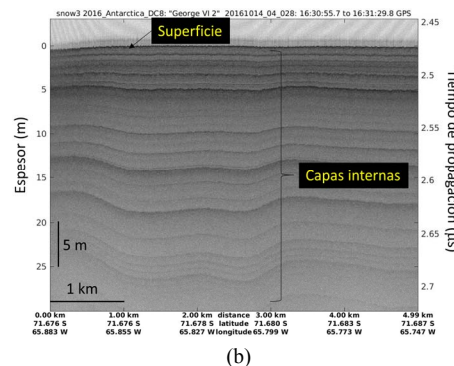
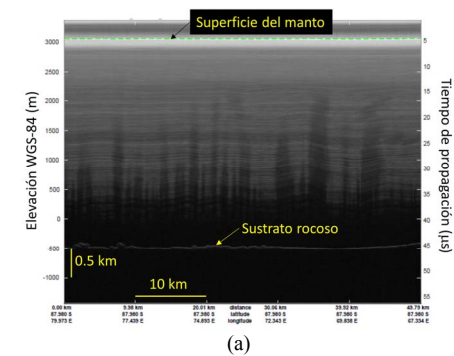


Fig. 5. Ecografías obtenidas a partir de datos adquiridos con el paquete de instrumentos del CRISIS a bordo del DC-8 de la NASA en el 2016, en vuelos desde Punta Arenas en Chile. (a) Ecografía derivada de datos del RDS/I mostrando la estructura interna del manto y la interface entre el hielo y el lecho rocoso a más de 3 km de profundidad; Ecografía resultante del radar para nieve (b) y de banda Ku (c) revelando capas estratificadas debajo de la superficie en las cercanías de la plataforma de hielo George VI; (d) Radargrama que ilustra la idoneidad del radar de 2-8 GHz para evaluar el grosor de la cubierta nival de la banquisa Antártica.

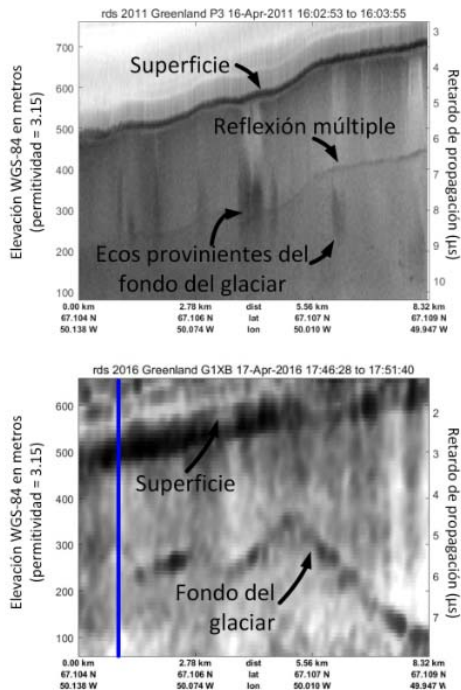


Fig. 6. Comparación de dos ecografías obtenidas en el glaciar Russell en Groenlandia a partir de dos instrumentos diferentes. El recuadro superior corresponde al RDS/I a bordo del P-3 de la NASA. El recuadro inferior corresponde a los datos de la sonda de 35 MHz embarcada en un UAS de ala fija operado más allá del horizonte en modo completamente autónomo [21,30].

recolección de datos científicos desde altitudes elevadas. Esto ha permitido la demostración del primer sondeo de hielo frío volando más allá de 8 km sobre el manto de hielo Antártico [14]. La Fig. 4 muestra una ecografía producida con datos obtenidos con el RDS/I en uno de estos vuelos de gran altitud sobre el polo sur, donde el grosor del hielo excede los 3 km. La versión más reciente del paquete de instrumentos del CReSIS que se utiliza a bordo del DC-8 está compuesto por el altímetro de banda Ku, el radar para nieve (2-8 GHz) y el radar para mediciones de espesura de hielo, el cual cuenta con un arreglo de antenas de 6 elementos y transmisores con 6-kW de potencia pico en el intervalo de 165-215 MHz¹. Para la próxima campaña, programada para el otoño del 2018, se tiene planeada la operación del radar de banda ultra ancha (2-18 GHz) para nieve, cuyo desempeño se ha verificado en el avión P-3 [47-48]. La Fig. 5 muestra ejemplos de las ecografías obtenidas en el 2016 con los instrumentos a bordo del DC-8. Estos resultados ilustran el potencial de los radares para determinar distintas propiedades de hielo, neviza y nieve de manera simultánea, sobre una amplia gama de condiciones y regiones geográficas de la Antártica, logrando la penetración a diferentes estratos y con resolución incremental.

IV. OPERACIÓN A BORDO DE AERONAVES SIN TRIPULACIÓN

Los UAVs o UASs [19] exhiben ventajas adicionales para sistemas de georadar, primordialmente en términos de reducción en el consumo de combustible, acceso a áreas muy

¹ Del 2009 al 2013 el RDS/I a bordo del DC-8 operó a una frecuencia de 195 MHz con 10 MHz de ancho de banda [13].

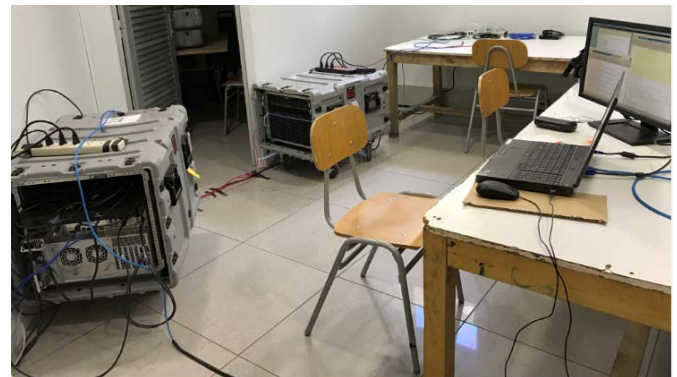


Fig. 7. Fotografía del equipo de cómputo móvil del CReSIS en las instalaciones de la Universidad de Magallanes. Los servidores se emplean para el procesamiento y respaldo de datos científicos.

inhóspitas para los aviones tripulados, y operaciones de larga duración. El espesor del glaciar Russell en Groenlandia fue sondeado recientemente por medio de un radar de baja frecuencia embarcado en una aeronave autónoma [21,30]. Las antenas del sistema fueron integradas con las alas del avión y el peso del radar se redujo drásticamente sin sacrificar su desempeño. La masa del radar es 2 kg con un consumo de potencia de alimentación inferior a los 20 W para producir 100 W de potencia pico de radio frecuencia. La Fig. 6 presenta resultados obtenidos en un corte que se extiende 8 km a lo largo del glaciar Russell. La ecografía demuestra la operatividad del radar para el escaneo del fondo del glaciar en una región donde la superficie exhibe grietas y plegamientos significativos. Como se mencionó anteriormente, estas características de la superficie producen señales de radar parasitarias tales que el fondo del glaciar es prácticamente indetectable para el RDS/I, salvo en dos instancias (recuadro superior). Por otro lado, en el recuadro inferior se observa que la sonda de baja frecuencia a bordo del UAS fue capaz de evaluar el grosor del glaciar hasta la zona frontal de desprendimiento. Estos resultados son un indicio de que esta tecnología pudiese facilitar el sondeo de hielo temperado como el que se encuentra en el glaciar Tyndall y otros ubicados en el campo de hielo sur en Patagonia [27].

V. COLABORACIÓN CON INSTITUCIONES CHILENAS

En la década del año 2000, se llevaron a cabo una serie de mediciones con instrumentación de la NASA y la Universidad de Kansas a bordo del avión P-3 de la Marina Chilena. Esta actividad también involucró al CECS [49-50]. En años más recientes, las operaciones de la OIB en Punta Arenas han permitido contacto e interacciones frecuentes con el CECS y el establecimiento de una colaboración estratégica con la UMag. Específicamente, CECS ha organizado seminarios que brindan a investigadores de Kansas la oportunidad de ofrecer presentaciones a su comunidad académica. La UMag, por su parte, ha brindado acceso a espacios adecuados para la operación del equipo de cómputo móvil empleado en el respaldo y procesamiento de datos. Este apoyo es crítico para la misión del CReSIS y de la operación IceBridge, pues permite la creación de copias redundantes de varios Terabytes y la generación de resultados preliminares en menos de 24 horas contadas a partir del término de cada vuelo. Ecografías

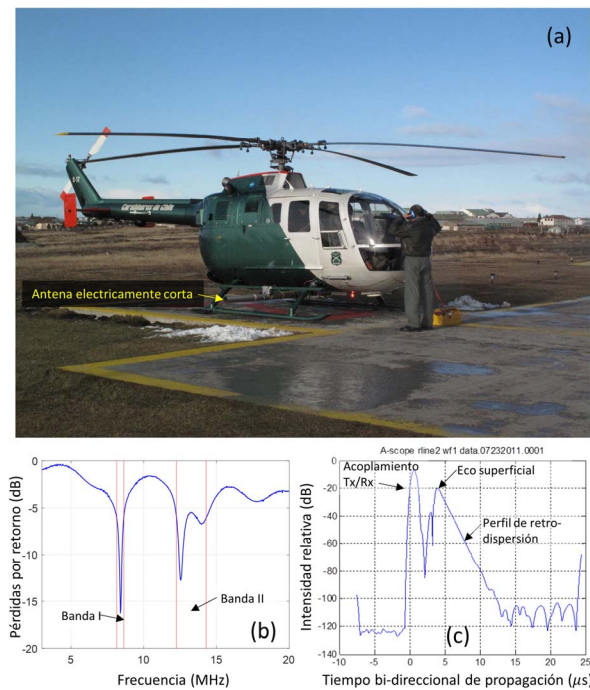


Fig. 8. (a) Fotografía de una antena eléctricamente corta instalada en el helicóptero de la unidad Aero policial de Carabineros de Chile.; (b) pérdidas por retorno de la antena, medidas durante un vuelo de prueba sobre el estrecho de Magallanes; and (c) Señal de radar recibida con el instrumento operando en la banda I.

de vista rápida son generadas para asegurar el control de calidad de la información recopilada, y, de ser necesario, permitir ajustes en los parámetros de operación de la instrumentación. La Fig. 7 es una fotografía del equipo de cómputo móvil de la Universidad de Kansas operando en las instalaciones de la UMag. Otra actividad importante en conjunto tuvo lugar durante las pruebas de un radar de HF [51] a bordo de un helicóptero de la unidad Aero-policial de los Carabineros de Chile, gestionadas por la Dirección de Programas Antárticos (DPA) de la UMag. La Fig. 8a muestra una fotografía del helicóptero equipado con una antena eléctricamente corta de doble banda, configurada para operación simultánea en los 8.4 MHz (Banda I) y 12.5 MHz (Banda II). La Fig. 8b es una gráfica de las pérdidas por retorno de la antena, determinadas con un analizador de redes portátil durante un vuelo de prueba sobre el estrecho de Magallanes. La Fig. 8c se obtuvo con datos del radar operando a 8.4 MHz valiéndose de la misma antena para transmisión y recepción mediante un conmutador de señales de radio frecuencia. La gráfica muestra la intensidad relativa de la señal recibida como función del tiempo bidireccional de propagación. El máximo en la respuesta es ocasionado por el acoplamiento entre el transmisor (Tx) y el receptor (Rx) mientras que el segundo pico es producto de la reflectancia de la superficie del océano. La disminución gradual en la amplitud es ocasionada por la retrodispersión de superficie. Estas pruebas constituyeron un precedente relevante para la demostración subsiguiente de la sonda de baja frecuencia reportada en la referencia [30], la cual empleó una estructura radiante muy similar a la instalada en el helicóptero de la Fig. 8. Otros aspectos de la colaboración con la UMag incluyen la interacción de estudiantes con personal del CREISIS y de la

NASA, la presentación de ponencias a audiencias locales y la participación de estudiantes y académicos chilenos en vuelos de reconocimiento a bordo del DC-8.

VI. RESUMEN

En este trabajo se presentó una descripción general de los sistemas de radar para mediciones de nieve y hielo con énfasis en los instrumentos desarrollados recientemente en la Universidad de Kansas. Estos y otros instrumentos son una herramienta única para el sondeo y visualización de masas de hielo y nieve a bordo de aviones con y sin tripulación en áreas geográficamente extensas y poco accesibles para mediciones *in situ*. Los experimentos de campo realizados desde territorio chileno han habilitado y expandido colaboraciones entre la Universidad de Kansas en Estados Unidos y varias instituciones chilenas.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al M.C. Victor Jara Olivares por su trabajo y dedicación durante las pruebas del radar de HF a bordo del helicóptero de Carabineros de Chile en Punta Arenas. Los autores extienden su agradecimiento al personal académico, profesorado y estudiantes de la Universidad de Kansas, el Centro de Estudios Científicos, a la DPA de la Universidad de Magallanes y a la unidad Aero-policial de Carabineros de Chile por su contribución y apoyo. Este trabajo se llevó a cabo con el patrocinio de la fundación Nacional de Ciencia (NSF), la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), la fundación filantrópica Paul G. Allen (PGAFF) en los Estados Unidos de América, así como la Dirección de Programas Antárticos de la Universidad de Magallanes, el Centro de Estudios Científicos y la unidad Aero-policial de Carabineros de Chile.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Primer Simposio Internacional de Geociencia y Teledetección GRSS-IEEE "Una Mirada al Estado del Arte de la Geociencia y la Teledetección en Chile y el Mundo." Junio 15 & 16, 2017 – Valdivia, Chile
- [2] L. Koenig, S. Martin, M. Studinger, and J. Sonntag (2010), Polar airborne observations fill gap in satellite data, *EOS Trans. AGU*, 91 (38), 333, doi: 10.1029/2010EO380002
- [3] N. Kurtz, J. Richter-Menge, S. Farrell, M. Studinger, J. Paden, J. Sonntag, and J. Yungel, IceBridge Airborne Survey Data Support Arctic Sea Ice Predictions, *EOS Trans. AGU*, Vol. 94, No. 4, 22 January 2013.
- [4] F. Hélière, C. Lin, H. Corr, and D. Vaughan, Radio Echo Sounding of Pine Island Glacier, West Antarctica: Aperture Synthesis Processing and Analysis of Feasibility From Space, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Vol. 45, No. 8, August 2007.
- [5] M. E. Peters, D. D. Blankenship, S. P. Carter, S. D. Kempf, D. A. Young, and J. W. Holt, Along-Track Focusing of Airborne Radar Sounding Data From West Antarctica for Improving Basal Reflection Analysis and Layer Detection, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Vol. 45, No. 9, September 2007.
- [6] A. Zirizzotti, L. Cafarella, and S. Urbini, Ice and Bedrock Characteristics Underneath Dome C (Antarctica) From Radio Echo Sounding Data Analysis, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Vol. 50, No. 1, January 2012.
- [7] J. P. Zavala de Paz, E. K. Anaya Rivera, C. Isaza Bohorques, E. Castillo Castañeda, Medición de la topografía de superficie en 3D de partículas aglomeradas utilizando un sensor laser, *Revista IEEE América Latina*, Vol. 16, No. 5, May 2018.

- [8] O. Bentley, "Airplane altitude indicating system," U.S. Patent 2,011,392, 1935.
- [9] S. Blunt, C. Allen, E. Arnold, R. Hale, R. Hui, S. Keshmiri, C. Leuschen, J. Li, J. Paden, F. Rodriguez-Morales, A. Salandrino, and J. Stiles, Radar Research at the University of Kansas, *SPIE Radar Sensor Technology XXI Conference*, Defense and Security Symposium, Anaheim, CA, 2007.
- [10] G. Raju, W. Xin, and R. Moore, "Design, development, field observations, and preliminary results of the Coherent Antarctic Radar Depth Sounder (CARDS) of The University of Kansas, USA," *J. Glaciol.*, vol. 36, no. 123, pp. 247–254, 1990.
- [11] S. Gogineni, T. Chuah, C. Allen, K. Jezek, and R. K. Moore, "An improved coherent radar depth sounder," *J. Glaciol.*, vol. 44, no. 148, pp. 659–669, 1998.
- [12] P. Kanagaratnam, S. Gogineni, V. Ramasami, and D. Braaten, "A wideband radar for high-resolution mapping of near-surface internal layers in glacial ice," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 42, no. 3, pp. 483–490, Mar. 2004.
- [13] P. Kanagaratnam, T. Markus, V. Lytle, B. Heavey, P. Jansen, G. Prescott, and S. Gogineni, "Ultrawideband radar measurements of thickness of snow over sea ice," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 45, no. 9, pp. 2715–2724, Sep. 2007.
- [14] J. Li, J. Paden, C. Leuschen, F. Rodriguez-Morales, R. Hale, E. Arnold, D. Gomez-Garcia, R. Crowe, and P. Gogineni, High-Altitude Radar Measurements of Ice Thickness over the Antarctic and Greenland Ice Sheets as a Part of Operation Ice Bridge, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Vol. 51, No. 2, Feb. 2013, pp.742-754.
- [15] B. Panzer, D. Gomez-Garcia, C. Leuschen, J. Paden, F. Rodriguez-Morales, A. Patel, T. Markus, B. Holt, P. Gogineni, An ultra-wideband, microwave radar for measuring snow thickness on sea ice and mapping near-surface internal layers in polar firn, *J. Glaciology*, Vol. 59, No. 214, 2013 doi:10.3189/2013JoG12J128.
- [16] C. Lewis, S. Gogineni, F. Rodriguez-Morales, B. Panzer, T. Stumpf, J. Paden, and C. Leuschen, Airborne fine-resolution UHF radar: an approach to the study of englacial reflections, firn compaction and ice attenuation rates, *J. Glaciology*, Vol. 61, No. 225, 2015, pp.89-100.
- [17] F. Rodriguez-Morales, S. Gogineni, C. Leuschen, J. Paden, J. Li, C. Lewis, B. Panzer, D. Gomez-Garcia, A. Patel, K. Byers, R. Crowe, K. Player, R. Hale, E. Arnold, L. Smith, C. Gifford, D. Braaten, and C. Pantan, Advanced Multi-Frequency Radar Instrumentation for Polar Research, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Vol. 52, No. 5, May 2014, pp. 2824-2842.
- [18] F. R. Morales, E. Arnold, R. Hale, S. Keshmiri, C. Leuschen, J. Li, and J. Paden, Multi-Spectral Radar Measurements of Ice and Snow Using Manned and Unmanned Aircraft, *Proc. Int. Symp. Geosci. Remote Sens.*, Valdivia, Chile, Jul. 2017.
- [19] R. Schanicht-Rodriguez, G. Ortiz-Torres, C. D. Garcia-Beltrán, C.M. Astorga-Zaragoza, J. C. Ponsart, A. J. Pérez-Estrada, Diseño y desarrollo de una plataforma experimental UAV, *Revista IEEE América Latina*, Vol. 16, No. 5, May 2018.
- [20] C. Leuschen, R. Hale, S. Keshmiri, J.B. Yan, F. Rodriguez-Morales, A. Mahmood, and S. Gogineni, UAS-Based Radar Sounding of Polar Ice Sheets, *IEEE Geosci. Remote Sens. Mag.*, Vol. 2, No. 1, Mar. 2014, pp. 8-17.
- [21] S. Keshmiri, E. Arnold, A. Blevins, M. Ewing, R. Hale, C. Leuschen, J. Lyle, A. Mahmood, J. Paden, F. Rodriguez-Morales, S. Yan, Radio Echo Sounding of Russell Glacier at 35 MHz Using Compact Radar Systems on Small Unmanned Aerial Vehicles, *2017 IEEE Geosci. Remote Sens. Intl. Symp.* Fort Worth, Texas, Jul. 2017.
- [22] S. Kaundinya, E. Arnold, F. Rodriguez-Morales, A. Patil, A UAS-based ultra-wideband radar system for soil moisture measurements, *Proc. 2018 IEEE Radar Conference*, Oklahoma City, OK, Apr. 2018.
- [23] Steinhage, D, U. Nixdorf, U. Meyer & H. Miller (1999). New maps of the ice thickness and subglacial topography in Dronning Maud Land, Antarctica, determined by means of airborne radio-echo sounding, *Annals of Glaciology*, 29, 267-272.
- [24] Christensen, E.L., Reeh, N., Forsberg, R., Jörgensen, J.H., Skou, N. and Woelders, K. 2000. A low-cost glacier-mapping system. *J. Glaciol.*, 46(154), 531–537.
- [25] N. Blindow, The University of Münster Airborne Ice Radar (UMAIR): Instrumentation and first results of temperate and polythermal glaciers, EGU General Assembly Conference Abstracts.
- [26] Dall, Jørgen; Kristensen, Steen Savstrup; Krozer, Viktor; Hernández, Carlos Cilla; Vidkjær, Jens; Kusk, Anders; Balling, Jan E.; Skou, Niels; Søbjærg, Sten Schmidl; Christensen, Erik Lintz, ESA'S POLarimetric Airborne Radar Ice Sounder (POLARIS): design and first results. *I E T Radar, Sonar and Navigation*, Vol. 4, No. 3, 2010, p. 488-496.
- [27] R. Zamora, D. Ulloa, G. Garcia, R. Mella, Airborne radar sounder for temperate ice: initial results from Patagonia, *J. Glaciology*, V. 55, N. 191, 2009, pp. 507-512.
- [28] Cárdenas, C. A.M., Jenett, M., Schünemann, K., Winkelmann, J. Instruments and methods sub-ice topography in Patriot Hills, West Antarctica: First results of a newly developed high-resolution FM-CW radar system. *Journal of Glaciology*. Vol. 56(195), 2010, pp.162-166.
- [29] Conway, H., Smith, B., Vaswani, P., Matsuoka, K., Rignot, E. and P. Claus, A low-frequency ice-penetrating radar system adapted for use from an airplane: test results from Bering and Malaspina Glaciers, Alaska. *Ann. Glaciol.*, 50(51), 93–97.
- [30] Arnold, E.; Rodriguez-Morales, F.; Paden, J.; Leuschen, C.; Keshmiri, S.; Yan, S.; Ewing, M.; Hale, R.; Mahmood, A.; Blevins, A.; Mishra, A.; Karidi, T.; Miller, B.; Sonntag, J. HF/VHF Radar Sounding of Ice from Manned and Unmanned Airborne Platforms. *Geosciences* 2018, 8, 182.
- [31] Kennet, M, T. Laumann & C. Lund. (1993). Helicopter-borne radio-echo sounding of Svaritsen, Norway. *Annals of Glaciology*, 17: 23-26.
- [32] Dowdeswell JA, MR Gorman, AF Glazovsky, YY Macheret. (1994). Airborne radio-echo sounding of the ice caps on Franz Josef Land. Datos de estudios glaciológicos. Part. 81. Acad. de Ciencias de la U.R.S.S., Moscú, 92-101.
- [33] Macheret Yu.Ya., Glazovsky A.F. (2000). Estimation of absolute water content in Spitsbergen glaciers from radar sounding data. *Polar Research*, vol. 19, no 2, p. 205-216.
- [34] Cárdenas, R. (2002). Uso de un sistema digital de radar, altimetría láser, video y fotografía a bordo de un avión para medir propiedades de glaciares. *Tesis de Ingeniero de Ejecución Eléctrico, Universidad de Magallanes*.
- [35] Yermolin, Yevgeniy, Ambientes glaciares y periglaciares: formación y desarrollo. - 1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires, 2015. 268 p.
- [36] A. Winter et al., Comparison of measurements from different radio-echo sounding systems and synchronization with the ice core at Dome C, Antarctica, *The Cryosphere*, 11, 653-668, 2017.
- [37] G. Koh, N. Yankielun, A. Baptista, Snow Cover Characterization using multi-band FMCW radars, *Hydrological Processes*, Vol. 10, 1609-1617, 1996.
- [38] H.P. Marshall and G. Koh, FMCW radars for snow research, *Cold Regions Science and Technology*, Vol.52, No. 2, Apr. 2008, pp. 118-131.
- [39] H. Gubler and M. Hiller, "The use of microwave FMCW radar in snow and avalanche research," *Cold Regions Sci. Technol.*, vol. 9, no. 2, pp. 109–119, July 1985.
- [40] J.B. Yan, S. Gogineni, F. Rodriguez-Morales, D. Gomez-Garcia, J. Paden, J. Li, C. Leuschen, D. Braaten, J. Richter-Menge, S. Farrell, J. Brozena, and R. Hale, Ultra-wideband FM-CW Radar for Snow Thickness Measurements, *IEEE Geosci. Remote Sens. Mag.*, Vol. 5, No. 2, Jun. 2017, pp.57-76.
- [41] K. A. Giles, S. W. Laxon, D. J. Wingham, D. Wallis, W. B. Krabill, C. J. Leuschen, D. McAdoo, S. S. Manizade, and R. K. Raney, "Combined airborne laser and radar altimeter measurements over the Fram Strait in May 2002," *Remote Sens. Environ.*, vol. 111, pp. 182–194, Nov. 2007.
- [42] R. L. Hawley, E. M. Morris, R. Cullen, U. Nixdorf, A. P. Shepherd, D. J. Wingham, "ASIRAS airborne radar resolves internal annual layers in the dry-snow zone of Greenland," *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, L04502, doi:10.1029/2005GL025147, 2006,
- [43] J. B. Yan, D. Gomez-Garcia, J.W. McDaniel, Y. Li, P. Gogineni, F. Rodriguez-Morales, J. Brozena, and C. Leuschen, Ultra-Wideband FMCW Radar for Airborne Measurements of Snow Over Sea-ice and Land, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Vol. 55, No. 2, Feb. 2017, pp. 834 – 843.
- [44] D. Gomez-Garcia, F. Rodriguez-Morales, P. Gogineni, and C. Leuschen, Ku-Band Radar Altimeter For Surface Elevation Measurements In Polar Regions Using A Wideband Chirp Generator With Improved Linearity, *Proc. IEEE Geosci. Remote Sens. Intl. Symp.*, Munich, Germany, July 2012, pp. 4617-4620.
- [45] B. Camps-Raga et al., A Ka-band altimeter demonstrator, in preparation.
- [46] R. Hale, H. Miller, S. Gogineni, J-B. Yan, F. Rodriguez-Morales, C. Leuschen, J. Paden, J. Li, T. Binder, D. Steinhage, M. Gehrman, and D. Braaten, Multi-channel Ultrawideband Radar Sounder and Imager, *Proc. 2016 IEEE Geosci. Remote Sens. Intl. Symp.*, Beijing, China, 2016 (invited). pp. 2112-2115.

- [47] F. R. Morales, et al., Measurements of Snow Cover Using An Improved UWB 2-18 GHz Airborne Radar Testbed, *Proc. 2018 IEEE Radar Conference*, Oklahoma City, OK, Apr. 2018.
- [48] F. R. Morales, et al., Packaging and Miniaturization of a 2-18 GHz UWB Radar for Measurements of Snow and Ice: Initial Results, *International Microelectronics and Packaging Society (IMAPS) Conference*, Raleigh, NC, Oct. 2017.
- [49] E. Rignot, et al., Accelerated ice discharge from the Antarctic Peninsula following the collapse of Larsen B ice shelf, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 31, L18401, 2004.
- [50] Rignot, E., et al. (2004), Improved estimation of the mass balance of glaciers draining into the Amundsen Sea sector of West Antarctica from the CECS/NASA 2002 campaign, *Ann. Glaciol.*, 39.
- [51] Jara-Olivares, V., Rodriguez- Morales, F., Leuschen, C., Ayyangar, H., and P. Gogineni. "Temperate Ice Depth-Sounder: A proved concept for temperate ice sounding", 06/01/2011-05/31/2012, 2010, "AGU Fall Meeting, San Francisco, CA".



Fernando Rodríguez-Morales (S'00, M'07, SM'17) received the B.S. degree in electronics engineering from Universidad Autónoma Metropolitana, Mexico City, Mexico, in 1999, and the M.S. and Ph.D. degrees in electrical and computer engineering from the University of Massachusetts, Amherst, MA, USA, in 2003 and 2007, respectively. His graduate work involved the development of devices, circuits and systems for passive remote sensing at microwave, millimeter-wave and sub-millimeter-wave frequencies.

He is currently with the Center for Remote Sensing of Ice Sheets, University of Kansas, Lawrence, KS, USA, where he is involved in the development and deployment of radar systems operating from HF through millimeter waves. His research interests include high-frequency electronics and passive and active remote sensing instruments. Dr. Rodríguez-Morales was a recipient of fellowships from the National Council for Science and Technology (Conacyt) and from the National Institute of Astrophysics, Optics and Electronics (INAOE) of Mexico.



Daniel Gómez-García Alvestegui (S'10) was born in Cochabamba, Bolivia, in 1985. He received the B.S. and M.S. degrees in electrical engineering from the University of Kansas (KU), Lawrence, KS, USA, in 2008 and 2011, respectively, where he is a doctoral candidate. Since 2010, he has been with the Center for Remote Sensing of Ice Sheets, KU. His current research interests include UWB signal generation and FMCW radars for remote sensing applications.



Emily J. Arnold received a B.S. in aerospace engineering from the University of Kansas, Lawrence, KS, in 2009, and the PhD from the University of Kansas in 2013. Dr. Arnold is an Assistant Professor in the aerospace engineering department at KU. She has served as the lead design and structural engineer for several airborne antenna arrays used for remote sensing ice sheets in Antarctica and Greenland. Prior to returning to KU as an Assistant Professor, she worked at the MITRE Corporation. Dr. Arnold was

the recipient of two NASA Earth and Space Science Fellowships, as well as the Zonta International's Amelia Earhart Fellowship.



Richard D. Hale received the B.S. degree in aerospace engineering from Iowa State University, Ames, IA, USA, in 1988, the M.S. degree in mechanical engineering from Washington University in St. Louis, St. Louis, WA, USA, in 1991, and the Ph.D. degree in engineering mechanics from Iowa State University in 1995. He is currently the C.E. and M.J. Spahr Professor and Chair of the department of aerospace engineering at The University of Kansas, Lawrence, KS, USA, where he also serves as an

Associate Director for Technology and the Air Vehicles Lead for the Center for Remote Sensing of Ice Sheets.



Shawn Keshmiri is an Associate Professor in the Department of Aerospace Engineering, University of Kansas, USA with expertise in Guidance, Navigation and Control, and Flight Test Engineering. Dr. Keshmiri has been in multiple UAS Polar missions and has led the UAS flight test activities at the Center for Remote Sensing of Ice Sheets, University of Kansas in Antarctica, Greenland, and the continental U.S. Dr. Keshmiri's team successfully developed control algorithms for multi-agent unmanned aerial systems (UASs) with high speeds and high inertias and performed validation and verification flight tests between two large collaborative UASs. Dr. Keshmiri became the John E. and Winifred Sharp Teaching Professor in 2017 and is an Associate Fellow of the American Institute of Aeronautical and Astronautics since 2015.



Carlton J. Leuschen (S'98-M'01) received the B.S. (with highest distinction), M.S., and Ph.D. (Hons.) degrees from the Radar Systems and Remote Sensing Laboratory, University of Kansas (KU), Lawrence, KS, USA, in 1995, 2001, and 2001, respectively. He was a Senior Professional Staff Member with the Applied Physics Laboratory, Space Department, Johns Hopkins University, Laurel, MD, USA. He is currently an Associate Professor with the department of electrical engineering and computer science, KU, where he is also the Deputy Director with the Center for Remote Sensing of Ice Sheets. His current research interests include the application of radar technologies for airborne measurements of ice sheets and radar sounding for planetary applications. Dr. Leuschen was a recipient of the Richard and Wilma Moore Thesis Award and a NASA Graduate Student Research Fellowship to develop a ground penetrating radar for Mars.



Jilu Li (M'01-SM'10) received the B.S. and M.S. degrees in aeronautics from Northwestern Polytechnical University, Xian, China, in 1985 and 1988, respectively, the Ph.D. degree in aeronautics from Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, China, in 1992, and the M.S. degree in aerospace engineering, the M.S. and Ph.D. degrees in electrical engineering from The University of Kansas (KU), Lawrence, KS, USA, in 2003, 2006, and 2009, respectively. Since 2011, he has been a research faculty member with the Center for Remote Sensing of Ice Sheets at the University of Kansas. His research interests are in developing advanced signal and array algorithms for processing and interpreting data of ice sheet radio echo sounding.



John D. Paden (S'95-M'06) received the M.S. and Ph.D.E.E. degrees from The University of Kansas (KU), Lawrence, KS, USA, studying multistatic 3-D imaging algorithms for remote sensing through media and leading the development of two multichannel radar systems for imaging through ice sheets, namely, one broadband system for ground operation and another for airborne operation. After graduating, he joined Vexcel Corporation, Boulder, CO, USA, which is a remote sensing company, where he worked as a Systems Engineer and a SAR Engineer for three and a half years before rejoining the Center for Remote Sensing of Ice Sheets (CReSIS), KU, in early 2012 to lead the signal and data processing efforts. He is currently a research faculty member at CReSIS. His research includes field work in Chile, Greenland, and Antarctica.



Carlos Cárdenas Member, IEEE received his Ph.D. degree in Radar for geophysics applications from Technische Universität Hamburg – Harburg, (TUHH) Hamburg, Germany, in 2007. His research interests include satellites and local remote sensing applications with emphasis in glaciology and monitoring of natural disasters. He is currently a researcher at GAIA – Antarctica Research Center from the University of Magallanes (UMag) in Chile.